



ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ АЕРОДИНАМІЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ДВОСТАДІЙНОМУ СЕПАРАТОРІ

Р. І. Рыбалко¹, А. К. Кралин²

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.*

E-mail: ¹ r_rybalko@rambler.ru, ² ak.kralin@gmail.com

Отримана 11 березня 2016; прийнята 22 квітня 2016.

Анотація. Проаналізовано робочі процеси класифікації сипких матеріалів в помольних агрегатах сухого подрібнення. На підставі цього запропоновано новий тип двостадійного сепаратора підвищеної ефективності із регулюванням однорідності фракційного складу матеріалу під дією турбулентності в зоні розділення. Наведено основні результати експериментальних досліджень повітряної сепарації сипких матеріалів в новому двостадійному сепараторі на лабораторному стенді й дослідних промислових зразках. Досліджено вплив швидкості двофазного потоку, конструктивних розмірів решітки гасіння великомасштабних вихрових структур й границі розділення на ефективність сепарації. Розглянуто взаємодію робочих органів машини із частинками матеріалу; вивчено механізм еволюції турбулентних структур двофазних потоків; виявлено залежності взаємодії повітряного потоку з окремими частинками матеріалу, що подрібнюється; вивчено характер розподілу концентрації частинок різних фракцій залежно від аеродинамічних характеристик елементів машини. Отримано вираз для діаметра рівноважної частинки, що є умовним показником співвідношення масових і аеродинамічних сил у даній точці потоку. Знайдено значення радіуса вихору після проходження решітки. Визначено основні аеродинамічні параметри розглянутої конструкції сепаратора, зроблено висновок про його працездатність.

Ключові слова: сухі сипкі матеріали, класифікація, сепаратор, повітряний потік.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ДВУХСТАДИЙНОМ СЕПАРАТОРЕ

Р. И. Рыбалко¹, А. К. Кралин²

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
2, ул. Державина, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.*

E-mail: ¹ r_rybalko@rambler.ru, ² ak.kralin@gmail.com

Получена 11 марта 2016; принята 22 апреля 2016.

Аннотация. Проанализированы рабочие процессы классификации сыпучих материалов в помольных агрегатах сухого измельчения. На основании этого предложен новый тип двухстадийного сепаратора повышенной эффективности с регулированием однородности фракционного состава материала действием турбулентности в зоне разделения. Рассмотрено взаимодействие рабочих органов машины с частицами материала; изучен механизм эволюции турбулентных структур двухфазных потоков; выявлены зависимости взаимодействия воздушного потока с отдельными частицами измельчаемого материала; изучен характер распределения концентрации частиц разных фракций в зависимости от аеродинамических характеристик элементов машины. Приведены основные результаты экспериментальных исследований воздушной сепарации сыпучих материалов в новом двухстадийном сепараторе на лабораторном стенде и опытных промышленных образцах. Исследовано влияние скорости двухфазного

потока, конструктивных размеров решетки гашения крупномасштабных вихревых структур и границы разделения на эффективность сепарации. Получено выражение для диаметра равновесной частицы, являющегося условным показателем соотношения массовых и аэродинамических сил в данной точке потока. Найдено значение радиуса вихря после прохождения решетки. Определены основные аэродинамические параметры рассмотренной конструкции сепаратора, сделан вывод о его работоспособности.

Ключевые слова: сухие сыпучие материалы, классификация, сепаратор, воздушный поток.

RESEARCHES OF AIR CLASSIFICATION OF BULK MATERIALS IN DRY GRINDING AGGREGATES IN THE TWO-STAGE SEPARATOR

Roman Rybalko ¹, Andrey Kralin ²

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiyivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.*

E-mail: ¹ r_rybalko@rambler.ru, ² ak.kralin@gmail.com

Received 11 March 2016; accepted 22 April 2016.

Abstract. Workflows classification of bulk materials in grinding dry grinding units has been analyzed. For this reason, we proposed a new type of two-stage separator of increased efficiency, having homogeneity adjusting fractional composition of material by the effect of turbulence in the separation zone. The interaction of the working bodies of the machine with the particles of the material has been considered; the mechanism of evolution of turbulent structures of two-phase flow has been studied; dependence of interaction of the airflow with the individual particles of the crushed material has been determined; the character of the distribution of the concentration of particles of different fractions depending on the aerodynamic characteristics of the machine elements has been studied. The main results of experimental studies of air separation of bulk materials in a new two-stage separator on the laboratory bench and advanced industrial designs have been given. The effect of the two-phase flow rate, the size of the lattice design of large-scale extinction vortex structures and division borders on separation efficiency have been analyzed. An expression for the equilibrium particle diameter, which is the conditional measure of the ratio of the mass and aerodynamic force at the point of flow has been achieved. Found vortex radius value after passing the grille has been found out. The basic aerodynamic parameters, considered separator design have been determined, it has been concluded that it is worked.

Keywords: dry bulk materials, air classification, separator, air flow.

Развитие промышленного потенциала не может быть реализовано без повышения эффективности промышленного оборудования. В настоящее время операция измельчения материалов не получила полного научного освещения. О глубине этой проблемы свидетельствует колоссальный объем средств, затрачиваемый в мире на измельчение различных материалов. Не создано машины, обеспечивающей измельчение в заданном диапазоне, что приводит к переизмельчению и невозможности добиться заданной тонкости помола. На практике всегда образуется часть материала, измельченного более тонко, чем требует технологический процесс. Переизмельченный продукт, обладающий высокой поверхностной

энергией, налипает на мелющие рабочие тела, что приводит к агломерации. Данные явления снижают эффективность помола, поскольку демпфирование ударных воздействий предотвращает разрушение частиц. Одним из эффективных методов устранения данного недостатка, а также снижения расхода энергии является своевременное удаление готового материала из помольного агрегата.

Постановка проблемы

Вышеизложенное свидетельствует об актуальности совершенствования машин для сортировки сыпучих материалов с широким спектром их

физико-механических свойств и в первую очередь гранулометрического состава. Одним из методов решения данной задачи является создание нового типа машин с применением аэродинамической классификации в агрегатах сухого измельчения.

Анализ последних исследований и публикаций

Одно из важных мест в технологии переработки полезных ископаемых и материалов для производства строительных смесей занимает воздушная классификация. На протяжении ряда последних лет к ней проявляется повышенный интерес, поскольку по сравнению с другими способами сортировки она проще и дешевле. Это процесс разделения, базирующийся на разнице физических свойств «размер – масса» и аэродинамических характеристик отдельных частиц. В качестве разделительной среды в этом случае используют воздух или горячие дымовые газы [1, 2]. В основу теоретических подходов к воздушной классификации положены работы по газовой механике известных ученых: Г. Н. Абрамовича, Л. Г. Лойцянского, П. Брэдшоу, Р. Бусройда, Б. Гильберта, А. С. Гиневского, А. Е. Смолдырева, Г. М. Островского и др.

Существующие способы сепарации измельчаемого материала, как известно, обладают высокой энергоемкостью, малыми сроками службы, недостаточной сепарирующей способностью, нарушением процесса сепарации при повышенной влажности, выдачей грубых продуктов с высоким содержанием малых фракций, сложностью конструкции и т. п.

Требование гомогенных условий разделения в воздушных классификаторах в некоторой степени выполняется только в спиральных, где процессы, происходящие в плоском спиральном потоке, контролируются и их можно описать [3, 4]. Во всех прочих применяются пространственные системы потока, а часто и несколько массовых сил, действующих в разных направлениях, например силы тяжести и центробежной. В практике математического моделирования процессов воздушной сортировки широкое распространение получили детерминированные и стохастические модели [5, 6].

В практике математического моделирования процессов аэродинамической классификации

наиболее широкое распространение получили так называемые детерминированные и стохастические модели. Основу первых из них составляет представление процесса как движения невзаимодействующих частиц в стационарном потоке газа. Детерминированные модели позволяют оценить влияние определяющих факторов на некоторые характеристики разделения (размер равновесной частицы, в ряде случаев граничный размер), но не позволяют получить расчетные выражения для кривых разделения. Построение кривых разделения возможно только на основе стохастических моделей процессов классификации, учитывающих совокупный эффект от случайных воздействий со стороны окружающей среды на каждую частицу. В практическом использовании аналитических формул для расчета кривых разделения проблемным является вопрос определения стохастических параметров, зависящих от пульсаций воздуха.

Обе приведенные модели процессов классификации не учитывают структуру турбулентного потока смеси воздуха и измельчаемого материала и специфику движения частиц материала различной гранулометрии. Теоретические основы создания машин классификации разработаны с позиций взаимодействия потока воздуха и отдельной частицы без учета пульсационных составляющих скорости воздуха и масштабов вихревых структур в потоках транспортирующей среды. Крупномасштабные вихревые структуры, обладающие высокой энергией, захватывают частицы различного размера, и при этом не происходит разделения фракций. В результате диффузии вихревые структуры в потоке могут разрушаться при ударе о стенку аппарата, и все захваченные частицы различных фракций будут возвращены на домол или вынесены из аппарата вместе с мелкой фракцией. В первом случае часть материала будет переизмельчаться, что приведет к перерасходу энергии, а во втором – в готовый продукт попадет недоизмельченный материал, что приведет к нарушению регламента помола. Этим механизмом объясняется низкая эффективность сортировки и большая засоренность фракций. Для обеспечения адекватности математических моделей, описывающих работу оборудования классификации материалов, необходимо учитывать влияние вихревых структур в потоках транспортирующей среды.

Цель работы

Целью исследования является изучение рабочих процессов классификации сыпучих материалов в помольных агрегатах сухого измельчения и на этой основе разработка нового типа двухстадийного сепаратора повышенной эффективности с регулированием однородности фракционного состава материала действием турбулентности в зоне разделения.

Основной раздел

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: анализ взаимодействия рабочих органов машины с частицами материала; изучение механизма эволюции турбулентных структур двухфазных потоков; выявление зависимости взаимодействия воздушного потока с отдельными частицами измельчаемого материала; изучение характера распределения концентрации частиц разных фракций в зависимости от аэродинамических характеристик элементов машины; определение оптимальных конструктивных параметров решетки гашения крупномасштабных вихревых структур, экранов-отражателей крупных частиц и устройства удаления переизмельченных мелких фракций. Помимо постановки физического эксперимента, подтверждающего работоспособность предложенной конструкции машины, выполнена проверка адекватности разработанных математических моделей, достоверности основных теоретических положений и основных выводов работы.

Рассматривается двухступенчатый сепаратор. Его первая ступень производит грубое разделение, во второй ступени осуществляется точное разделение, где размер равновесной частицы соответствует заданному значению. Такое решение позволяет в несколько раз снизить циркуляционную нагрузку во второй ступени и предотвращает появление в нем крупных вихрей турбулентного следа.

Разработка первой ступени классификатора основывается на принципиально новых решениях разделения, т. к. в ней необходимо полностью исключить осаждение мелкой фракции и подготовить материал к точному разделению во второй ступени. Во время движения крупных частиц в турбулентном потоке происходит налипа-

ние на них мелких частиц, которые, кроме того, часто объединяются в агломераты и при традиционных методах разделения уходят в крупную фракцию. Поэтому в первой ступени устанавливается экран на пути двухфазного турбулентного потока, частично перекрывающий газопоток. Мелкие частицы, время релаксации которых невелико, огибают экран вместе с потоком воздуха и уходят во вторую ступень сепаратора на точное разделение. Крупные частицы и конгломераты в результате удара об экран разрушаются и попадают в зону осаждения, а мелкие частицы, подхваченные потоком, доставляются во вторую ступень (рисунки 1, 2).

Аэродинамическая классификация частиц осуществляется в газодисперсном потоке. Частица в газодисперсном потоке испытывает действие альтернативных сил, приводящих к разделению частиц по крупности. Одна из таких сил – аэродинамическое сопротивление, другая – массовая – пропорциональна объему частицы. Целью моделирования процесса классификации является получение зависимостей, которые связывают параметры кривой разделения с конструктивными параметрами аппарата. Модель движения частицы в стационарном потоке газа определяется совокупностью следующих уравнений в векторной форме [7]:

поля скоростей несущего газа:

$$\vec{v} = \vec{v}(r);$$

результатов действия альтернативных сил:

$$m \frac{d\vec{w}}{dt} = \vec{F}_m - \xi \cdot \frac{\pi d_u^2}{4} \cdot \frac{\rho_g (\vec{v} - \vec{w})^2}{2},$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{w}$$

с начальными условиями:

$$\vec{r}(0) = \vec{r}_0, \quad \vec{w}(0) = \vec{w}_0, \quad \text{при } t = 0,$$

где m – масса частицы;

\vec{r} – радиус-вектор частицы;

\vec{v} – скорость несущего газа;

\vec{w} – скорость частицы;

F_m – равнодействующая массовых сил;

d_u – диаметр частицы;

ρ_g – плотность газа;

ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы.

В аэродинамическом классификаторе имеет место турбулентное течение воздушного потока.

Основными параметрами, его характеризующими, помимо числа Рейнольдса и динамической

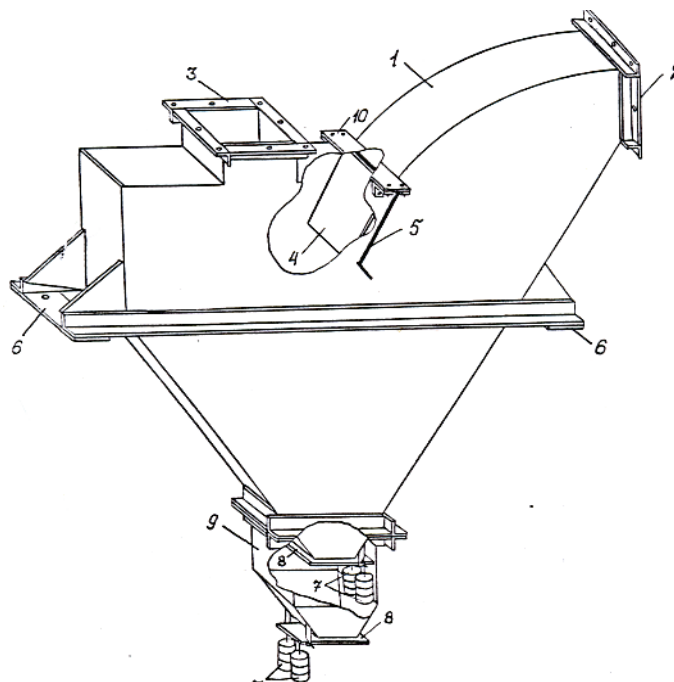


Рисунок 1. Первая ступень пневмокласификации измельченного материала: 1 – осадительная камера, 2 – входной патрубков, 3 – выходной патрубков, 4 – экран-отражатель, 5 – рукоятка управления экраном-отражателем, 6 – опорные лапы, 7 – грузы, 8 – заслонка, 9 – промежуточный бункер.

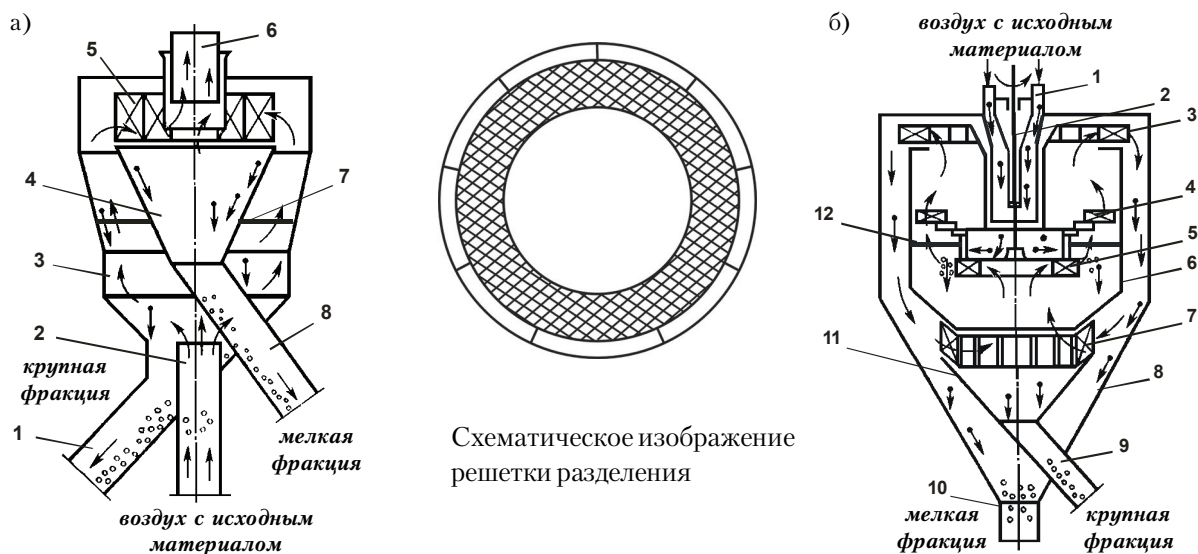


Рисунок 2. Схемы второй ступени для разделения полидисперсных смесей: а) вариант – проходной сепаратор: 1, 2 – патрубков, 3 – корпус, 4 – внутренний конус, 5 – лопасти, 6, 8 – труба, 7 – решетка; б) вариант – циркуляционный сепаратор: 1 – патрубков, 2 – вал, 3 – тарелка, 4 – крыльчатка, 5 – вентилятор, 6 – корпус, 7 – жалюзи, 8 – корпус, 9, 10 – трубы, 11 – воронка, 12 – решетка.

скорости, являются степень турбулентности, масштаб турбулентности, частота турбулентных пульсаций и их распределение.

Исследование частотного спектра дает ключ к пониманию механизма передачи энергии от осредненного движения газа к пульсационному движению разнообразных масштабов и позволяет адекватно отобразить поле скоростей несущего газа. При этом спектр пульсаций разбивается на интервалы: интервал низких частот или больших энергоемких вихрей, которые могут влиять на движение как мелких частиц, так и крупных; интервал средних частот или инерционный интервал, в котором происходит передача энергии вдоль спектра – от низких частот к высоким, и их влияние на крупные частицы незначительно; интервал высоких частот или интервал диссипации турбулентной энергии, где происходит рассеяние механической энергии в тепло, и на поле скоростей несущего газа высокочастотные вихри не влияют.

При стационарной турбулентности пульсационная составляющая скорости элементарного объема воздуха является стационарной функцией времени. Такая функция исследуется при помощи преобразований Фурье. В статистической гидромеханике доказано, что свойства корреляционной функции $r_1(\tau)$ таковы, что можно воспользоваться обычным косинус-преобразованием:

$$R_L(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} F_L(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} \cos \omega\tau E(\omega) d\omega \quad (1)$$

при $\tau = 0$ $R_L(0) = \overline{v^2} = \int_0^{\infty} E(\omega) d\omega,$

где $E(\omega)$ – энергетический спектр. В случаях двухфазной струи движение частиц материала зависит от законов движения транспортирующей среды, в случае пневмоклассификации – от законов движения воздуха. Скорость $w(t)$ частицы описывается дифференциальным уравнением:

$$\Lambda \frac{dw}{dt} + w(t) = v(t), \quad (2)$$

где Λ – постоянная времени, характеризующая инерцию частицы,
 $v(t)$ – скорость воздуха на траектории частицы.

Средний квадрат скорости частицы определяется:

$$\overline{w^2} = \int_0^{\infty} E_w(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} \frac{E_v(\omega) d\omega}{1 + \omega^2 \Lambda^2}. \quad (3)$$

Учитывая, что корреляционная функция R_v аппроксимируется выражением $R_v(\tau) = v^2 \exp(-\tau/T_v)$, в результате преобразований Фурье получено:

$$E_v(\omega) = \frac{2}{\pi} \frac{\overline{v^2} T_v}{1 + \omega^2 T_v^2}. \quad (4)$$

Аналогично, преобразование Фурье для функции $(1 + \omega^2 \Lambda^2)^{-1}$ имеет вид: $(\pi/\Lambda) \exp(-\tau/\Lambda)$. Применение уравнения Парсеваля дает:

$$\overline{w^2} = \int_0^{\infty} \frac{E_v(\omega) d\omega}{1 + \omega^2 \Lambda^2} = \frac{2}{\pi} \overline{v^2} \frac{\pi}{2\Lambda}, \quad (5)$$

$$\int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\tau}{T_v} - \frac{\tau}{\Lambda}\right) d\tau = \frac{\overline{v^2} T_v}{\Lambda + T_v}.$$

Последнее уравнение позволяет оценить средний квадрат поперечной (соответственно и пульсационной) составляющей скорости частицы в потоке через характеристики струи воздуха и величину Λ , зависящую от скорости витания частицы, то есть от ее размеров и плотности.

Поперечная составляющая скорости частицы регламентирует длину и поперечное сечение газоходов, т. е., если частица достигает стенки аппарата независимо от размеров, она не поддается аэродинамической классификации. Поэтому предлагается осуществлять управление размерами турбулентных структур за счет установления решеток на пути их следования. Причем место их расположения в зоне разделения должно соответствовать условию недостижимости частицами стенки классификатора.

Разрушение крупномасштабных турбулентных вихрей позволяет аппроксимировать движение потока макрохарактеристиками. Линейные масштабы турбулентности, характеризующие перемещение поперек и вдоль потока больших вихрей (L_{v0}, L_{u0}), можно получить из формулы Жуковского.

Поперечный срез слоя смешивания (Δ_c) состоит из трех частей: вихря размером $2r_0$, двукратного пути поперечного перемещения вихря $2L_{v0}$ и толщины потока Δ_y , обтекающего вихрь. Таким образом,

$$\Delta_c = 2r_0 + 2L_{v0} + \Delta_y. \quad (6)$$

Учитывая, что толщина слоя смешивания (Δ_c) не может быть больше Δ – характерного размера ячейки решетки, то можно сделать вывод, что радиус вихря (r_0) после прохождения решетки меньше или равен $0,22\Delta$, т. е.:

$$r_0 \leq 0,22\Delta. \quad (7)$$

На законы движения частиц материала влияют крупномасштабные вихри и распределение осредненных скоростей в воздушном потоке. Крупномасштабные явления приводят к деформации эпюры осредненных скоростей в потоке. Наша задача заключается в ограничении размеров крупномасштабных структур, которые бы не захватывали большие частицы. Захват может произойти при условии, когда диаметр вихря достаточно велик в сравнении с длиной пути релаксации частицы.

Связь между скоростью и завихренностью определяется при помощи интеграла Био-Савара:

$$V = c_0 \int \frac{(\omega \times r)}{r^3} dr.$$

Крупномасштабный вихревой элемент образует окружность радиусом r_0 . Индуцированная им скорость вынуждает двигаться сам вихрь. Скорость поступательного движения вихря была определена Прандтлем [8]:

$$V = \frac{a^2 \Omega}{2r_0} \ln \left(\frac{6r_0}{a} \right), \quad (8)$$

где r_0 – радиус вихревого элемента;
 a – его тороидальный радиус;
 Ω – завихренность.

Количественные описания крупномасштабных явлений в турбулентных течениях построены на двухточечных корреляциях. После трехмерного преобразования Фурье уравнений Навье–Стокса для двух произвольных точек P и P' , расположенных в поле турбулентности, можно получить уравнение в спектральной форме для энергетического спектра:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} &= W - 2\nu k^2 E, \\ \frac{\partial(Edk)}{\partial t} &= Wdk - 2\nu k^2 Edk, \\ \int_0^\infty Ed\lambda &= \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2), \end{aligned} \quad (9)$$

где E – энергетический спектр;
 ν – кинематический коэффициент вязкости;

k – волновое число;

W – член, характеризующий перенос энергии, обусловленный тройными корреляциями скорости.

В данном случае вихрь возникает без подведения энергии за счет нелинейных эффектов, поэтому переносным членом W можно пренебречь и получить при заданных исходных условиях решение уравнения:

$$E = C_0 k^4 \exp[-2\nu k^2 (t - t_0)], \quad (10)$$

где C_0 и t_0 – постоянные, определяемые из исходных условий.

Оценки энергии вихрей, их размеров, завихренности позволяют определить для заданного диаметра равновесных частей необходимые параметры однородности турбулентного потока и граничные размеры вихрей.

Для описания движения крупных частиц в зоне осаждения и определения расхода воздуха в сепараторе необходимо рассматривать взаимодействие частиц с экраном. В общем случае экран не обязательно будет плоским, за счет изменения его формы возможно управление направлением движения отраженных частиц. С позиции описания движения частицы как материальной точки получено соотношение, связывающее проекции скорости частицы на нормаль и касательную к поверхности до и после удара. По теореме об изменении количества движения в проекциях на нормаль и касательную к поверхности удара получена система уравнений:

$$mw_n^+ - (-mw_n^-) = S_n, \quad mw_r^+ - mw_r^- = S_r,$$

где S_n и S_r – нормальная и касательная проекция импульса ударной силы,

«+» и «-» – индексы, соответствующие состояниям частицы после и до удара.

Определение S_n и S_r (нормальной и касательной проекции импульса ударной силы) является задачей теории удара. Во время удара оба тела будут испытывать относительное вдавливание в районе точки соударения вместе с большими деформациями объектов в целом.

Теория местных деформаций, основанная на схеме, предложенной Герцем, дает возможность спрогнозировать большинство параметров удара, которые можно проверить экспериментально. Предлагается полуэмпирическое решение, основанное на экспериментальных оценках скоростей частиц после их отражения экраном.

В теории удара используется понятие коэффициента возобновления скорости частицы при нормальном ударе ($\alpha = \pi/2$), определяемого по формуле $k_y = |w_n^+|/|w_n^-|$. Величина k_y определяется экспериментально. Считаем, что касательная составляющая импульса ударной силы обусловлена только силой сухого трения и связана с нормальной составляющей традиционным соотношением, соответствующим закону трения Кулона:

$$S_\tau = fS_n,$$

где f – коэффициент трения частицы о поверхность.

В результате решения системы уравнений получено:

$$\begin{aligned} w_n^+ &= k_y w_n^-, & w_\tau^+ &= w_n^- - f(1+k_y)w_n^-, \\ \alpha^+ &= \arctg \left[\operatorname{tg} \alpha^- - \frac{f(1+k_y)}{k_y} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Зная расход воздуха, подаваемого в сепаратор, определяется скорость частиц и направление их движения после удара в зону осаждения.

Детерминированная модель при описании процесса разделения в однородном восходящем потоке имеет вид (ось x направлена вверх):

$$\begin{aligned} \dot{w} &= -g - \xi \cdot \frac{\pi \delta_q^2}{4m} \cdot \frac{\rho_g}{2} \frac{|\vec{v}(x) - \vec{w}|}{2} (\vec{w} - \vec{v}(x)), \\ \dot{x} &= \vec{w}; & v(x) &= \frac{Q}{F(x)}; & \operatorname{Re}_\delta &= \frac{\delta |w - v(x)| \cdot \rho_g}{\mu}, \end{aligned} \quad (12)$$

где \vec{v} – скорость несущего газа;

\vec{w} – скорость частицы;

δ_q – диаметр частицы;

ρ_g – плотность газа;

ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;

Q – расход газа сквозь вертикальный газоход;

g – ускорение силы тяжести;

$F(x)$ – закон изменения площади сечения газохода.

Одна из важнейших характеристик процесса аэродинамической классификации – размер равновесной частицы, находящейся в относительном равновесии в рабочем пространстве классификатора под влиянием определяющих сил процесса, т. е. имеет нулевую скорость вдоль его определяющей координаты. Считая, что в уравнениях для общего случая одночленной за-

висимости ξ , получено выражение для диаметра равновесной частицы:

$$\delta_p = \left[\frac{3}{4} a \frac{\mu^n \rho^{1-n}}{g \rho_g} |v(x)|^{2-n} \right]^{1/(1+n)}. \quad (13)$$

Размер равновесной частицы является условным показателем соотношения массовых и аэродинамических сил в данной точке потока. Устойчивость равновесия можно наблюдать только в том случае, если пульсационные составляющие газа для данного размера частицы практически не влияют на ее движение.

Детерминированные модели позволяют оценить влияние определяющих факторов на некоторые характеристики разделения (размер равновесной частицы, в некоторых случаях граничный размер), но не позволяют получить расчетное выражение для кривых разделения. Их построение возможно только на основе стохастических моделей процессов классификации, учитывающих совокупный эффект от случайных воздействий со стороны окружающей среды на каждую частицу. Базовым уравнением стохастических моделей является дифференциальное уравнение сохранения массы каждой фракции исходного продукта шириной $[\delta, \delta + d\delta]$, которое в стационарном случае имеет вид:

$$\frac{d}{dx} \left(\rho w - D \frac{d\rho}{dx} \right) = q_e(x, \delta), \quad (14)$$

где $\rho = \rho(x, \delta)$ – линейная концентрация частиц фракции;

w – скорость квазистационарного движения фракции;

D – коэффициент макродиффузии частиц;

$q_e(x, \delta)$ – плотность подведения частиц фракции от внешнего источника.

Наиболее общее расчетное выражение для кривой разделения, полученное для случая $D = \text{const}(x, \delta)$, имеет вид:

$$\varphi_\delta = \frac{I_1 - \frac{1}{sw_{f1}} \exp(-a(1))}{I_2 + \frac{1}{s} \left(\frac{1}{w_{f1}} \exp(-a(1)) + \frac{1}{w_{f2}} \right)}, \quad (15)$$

где

$$I_1 = \int_{x_2}^1 \left\{ \exp[-a(x)] \cdot \left[\int_{x_2}^x q_e(y) dy \right] \right\} dx,$$

$$I_2 = \int_{x_2}^1 \exp[-a(x)] dx, \quad a(x) = s \int_{x_2}^x w(x) dx, \quad (16)$$

$$s = v_1 x_1 / D,$$

v_1 – характерная (расходная) скорость газа на внешней границе зоны разделения.

Параметр s является аналогом критерия Пекле в чисто диффузионных процессах и играет важную роль в теории классификации. При $D \rightarrow 0$, $s \rightarrow \infty$ первое из приведенных уравнений описывает движение среды из частиц с нерассеянными скоростями, а последнее дает кривую разделения идеальной классификации.

На основании проведенных исследований предложена новая двухстадийная конструкция классификатора. Первая ступень, разработанная на методах разделения газодисперсного потока при помощи ударно-отражательных экранов, позволяет резко изменять направление движения крупных частиц со значительным временем релаксации. В это же время мелкие частицы транспортируются во вторую ступень классификатора, где для регулирования размеров вихревых структур в зоне разделения установлена решетка, обеспечивающая однородную турбулентность.

Экспериментальные исследования выполнены на лабораторной установке и промышленном оборудовании. На установке проводились исследования как для первой ступени классификатора, так и для второй. Для исследования первой ступени использовался материал (мергель, кварцит, гипс) с размерами частиц до 5 мм, для второй – до 0,5 мм. При моделировании первой ступени ставилась заглушка на решетку и воздух подавался в зону загрузки. При моделировании второй ступени снимался экран-отражатель и воздух подавался в зону разделения. Материал может подаваться в зону загрузки в трех вариантах: из бункера 7 – прямо в зону загрузки; из бункера 7 – в мельницу, а из нее – в зону загрузки; совместно в заданном соотношении из бункера 7 и из мельницы. Материалы, взятые для выполнения экспериментальных исследований, отвечают требованиям ГОСТ.

Экспериментально выполнено исследование распределения поля скоростей воздушного потока при обтекании плоского экрана-отражателя. Определялась скорость воздуха после удара транспортирующего воздуха об экран. Скорость

воздуха определена косвенно по углу отклонения пластинок, висящих на струне. Тарирование данного стенда осуществлялось с помощью анемометра У5 ГОСТ 6376-84.

Замеры проведены на высотах от 10 до 200 мм при различных расстояниях от места подачи воздуха до экрана, углах соударения потока воздуха с экраном и различной осредненной скорости воздуха на выходе из газохода. Экран прямоугольной формы со сторонами 400×300 мм. Сечение газохода квадратное, 150×150 мм. Графики изменения скоростей воздуха на расстоянии 0,15 м от экрана вдоль одной из координатных осей при фиксированном значении второй координаты приведены в работе [9].

Исследовано влияние скорости двухфазного потока, конструктивных размеров решетки гашения крупномасштабных вихревых структур и границы раздела на эффективность разделения. Изучение процесса разделения во второй ступени классификатора позволило выявить его рациональные параметры, в частности соотношение диаметра прутков решетки (D) и расстояния между прутками (D_1), т. е. D/D_1 [9].

Выводы

1. Современный подход к созданию новых типов сепараторов высокой эффективности для разделения сыпучих материалов широкого спектра разнофракционности базируется на разрушении крупных турбулентных вихрей.
2. Разработана математическая модель турбулентной миграции частиц измельчаемого материала и определены масштабы ее влияния на процессы аэровоздушной классификации газодисперсных потоков.
3. Разработаны теоретические предпосылки для создания эффективного оборудования на базе исследования динамики энергетического спектра турбулентных структур двухфазной среды; ликвидации крупномасштабных турбулентных структур и нового подхода к предварительной классификации на принципах удара, позволяющего разрушать конгломераты частиц, образующихся за счет сил поверхностного натяжения.
4. Проведенные экспериментальные исследования позволили сделать вывод о работоспособности предложенного двухстадийного

сепаратора для воздушной классификации сыпучих материалов в помольных агрегатах сухого измельчения.

5. Результаты экспериментальных исследований использованы в разработках технической

документации при создании оборудования на ОАО «Красногоровский огнеупорный комбинат», ОАО «Часовоярский огнеупорный комбинат», ЗАО «Передвижная механизированная колонна № 116».

Литература

1. Смышляев, Г. К. Воздушная классификация в технологии переработки полезных ископаемых [Текст] / Г. К. Смышляев. – М. : Недра, 1969. – 101 с.
2. Мизюнов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков [Текст] / В. Е. Мизюнов, С. Г. Ушаков. – М. : Химия, 1989. – 160 с.
3. Рыбалко, Р. И. Теоретические основы создания сепараторов новой конструкции [Текст] / Р. И. Рыбалко // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. 2004. Вип. 2004–5(47) : Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. С. 113–119.
4. Рыбалко, Р. И. Теоретические исследования рабочих процессов аэродинамической классификации в помольных агрегатах сухого измельчения [Текст] / Р. И. Рыбалко, О. В. Гуцин, А. К. Кралин // Збірник наукових праць ДонІЗТ. Донецьк, 2014. № 39. С. 17–25.
5. Основы создания оборудования на базе учета влияния турбулентных структур многофазных потоков [Текст] / А. Н. Баранов, И. А. Емельянов, Р. И. Рыбалко, С. В. Постельняк // Промислова гідраліка і пневматика. 2004. № 1(3). С. 21–24.
6. Пат. 18198 Україна, МПК В02С 23/10 (2006.01). Двостадійний класифікатор сипучих матеріалів [Текст] / Рыбалко Р. І., Баранов А. М.; заявник та патентовласник Рыбалко Р. І. – № u200609779; заявл. 12.09.06; опубл. 16.10.06, Бюл. № 10. – 6 с.
7. Бэйли, Придди. Влияние интенсивности и частоты турбулентных пульсаций основного потока на теплообмен в турбинной решетке лопаток [Текст] / Придди Бэйли // Тр. Америк. о-ва инженеров-механиков. Энерг. машины и установки. 1981. Т. 103, № 1. С. 45–50.
8. Методы расчета турбулентного пограничного слоя [Текст] / А. С. Гиневский, В. А. Иоселевич, А. В. Колесников [и др.] // Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа / ВИНТИ. 1978. 11. С. 155–304.
9. Рыбалко, Р. И. Экспериментальные исследования воздушной классификации сыпучих материалов в помольных агрегатах сухого измельчения в процессе строительства автомобильных дорог [Текст] / Р. И. Рыбалко, В. М. Гуцин // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. 2014. № 4. С. 92–99.

References

1. Smyshliaev, G. K. Air selection at treatment process of mineral resources. Moscow: Nedra, 1969. 101 p. (in Russian)
2. Miziunov, V. E.; Ushakov, S. G. Aerodynamic classification of powders. Moscow: Chemistry, 1989. 160 p. (in Russian)
3. Rybalko, R. Theoretical basis of development of new-designed separators. In: *Proceeding of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2004, Issue 2004–5(47): Process engineering, organization, powering and geodetic support of civil engineering, pp. 113–119. (in Russian)
4. Rybalko, R.; Gushchin, O.; Kralin, A. Theoretical research of workflows of aerodynamic classification in grinding aggregates of dry grinding. In: *Zbirnik Naukovih Prac'*, 2014, No. 39, pp. 17–25. (in Russian)
5. Baranov, A. N.; Emelianova, I. A.; Rybalko, R. I.; Postelniak, S. V. Foundations of equipment manufacturing based on accounting of the influence of turbulent structures of multiphase flows. In: *Industrial hydraulics and pneumatics*, 2004, No. 1(3), pp. 21–24. (in Russian)
6. Pat. 18198 Ukraine, MPK B02C 23/10 (2006.01). Two-stage classifier of granular materials / Rybalko R. I., Baranov A. M.; proprietor Rybalko R. I. No. u200609779; declaration 12.09.06; published 16.10.06, Bul. No. 10. 6 p. (in Ukrainian)
7. Beyli, Priddy. The influence of intensity and frequency of turbulent fluctuation of main stream on heat exchange at turbine cascade of blades. In: *American Society for Mechanical Engineers, Energy, machines and devices*, 1981, Issue 103, No. 1, pp. 45–50. (in Russian)
8. Ginevskiy, A. S.; Ioselevich, V. A.; Kolesnikov, A. V.; Lapin, Yu. V.; Pilipenko, V. N.; Sekundov, A. N. Method of analysis of turbulent boundary layer. In: *Results of science and engineering. Series. Fluid mechanics / All-Union Institute of Scientific and Technical Information*, 1978, 11, pp. 155–304. (in Russian)
9. Rybalko, R. I.; Guschin, V. M. Experimental researches of air classification of bulk materials in dry grinding aggregates in the construction of roads. In: *Mercury of Donetsk Academy of Highway transport*, 2014, No. 4, pp. 92–99. (in Russian)

Рибалко Роман Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: модернизация, расчет машин для производства строительных материалов.

Кралин Андрей Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: основы модернизации, проектирование, расчет и техническая диагностика строительных машин.

Рыбалко Роман Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: модернизация, расчет машин для производства строительных материалов.

Кралин Андрей Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: основы модернизации, проектирование, расчет и техническая диагностика строительных машин.

Rybalko Roman – PhD (Engineering), Associate Professor; Hoisting Transport, Building, Road Machines and Equipment Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: modernization, payment machines for the production of building materials.

Kralin Andrey – PhD (Engineering), Associate Professor; Hoisting Transport, Building, Road Machines and Equipment Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: basis of modernization, designing, calculation and engineering diagnostics of building machines.